

0-777588

На правах рукописи

Едельсков Алексей Евгеньевич



**ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТЕЙ
СВЯЗИ И ВЕЩАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПО ФАКТОРУ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Специальность 05.12.13 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2009

Работа выполнена в Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева

Научный руководитель:

кандидат технических наук, профессор
Линдваль Владимир Романович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Сподобаев Юрий Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Сабаев Ирек Анварович

Ведущая организация: Уфимский государственный авиационный технический университет, г.Уфа.

Защита состоится на заседании диссертационного совета Д 212.079.03 при Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева «30» июня 2009г. в ____ часов по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 31.

E-mail: kai@kstu-kai.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева, с авторефератом – на сайте КГТУ им.А.Н.Туполева: <http://www.kai.ru>

Ваши отзывы, заверенные печатью, просим выслать по адресу 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, д.10 на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан “__” мая 2009 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000547843

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, профессор

Г.И.Щербаков

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие современных технологий передачи информации (мобильной связи, широкополосного доступа, цифрового телевидения) привело к освоению новых частотных диапазонов, росту числа радиоканалов связи, теле- и радиовещания. Особенностью этих средств является создание пространственно-распределенной зоны радиопокрытия, что приводит к увеличению электромагнитного фона в окружающей среде. Как следствие, сформировался новый значимый фактор загрязнения окружающей среды – электромагнитный. В перспективе развития современных технологий следует ожидать роста количества технических средств, излучающих электромагнитную энергию в окружающую среду.

Многие технически развитые страны реализуют как свои национальные программы исследования биологического действия электромагнитного поля (ЭМП) и обеспечения безопасности человека и экосистем в условиях нового глобального фактора загрязнения окружающей среды (HPA-PDA, Англия; ARPANSA, Австралия), так и международные проекты (IEC, ICES, ICNIRP). Исследования проводятся и в рамках международного проекта Всемирной организации здравоохранения (WHO EMF project), включившей проблему глобального электромагнитного загрязнения (ЭМЗ) в перечень приоритетных для человечества.

Существующие методы контроля ЭМЗ имеют существенные недостатки: использование изолированного подхода, при котором не учитывается вклад функционирующих радиопередающих средств (РПС) при проведении санитарно-гигиенической экспертизы планирующегося к вводу в эксплуатацию РПС, невозможность проведения инструментального контроля уровня ЭМП на высотах зданий перспективной застройки и недоступность некоторых территорий. Указанные недостатки могут приводить к появлению зон, в которых превышает предельно допустимый уровень поля.

В таких условиях актуальной становится задача эффективного прогнозирования и размещения РПС с обеспечением необходимой зоны радиопокрытия и минимальной территории с превышением уровнем ЭМП предельно допустимого значения. Решение этой задачи на этапе территориального планирования радиопередающих телекоммуникационных сетей или отдельного технического излучающего средства поможет избежать дополнительных затрат на повторное планирование или демонтаж при выявлении недопустимых уровней ЭМП на этапе инструментального контроля полей вводимых в эксплуатацию объектов. Анализ существующих работ показывает, что данным вопросам до настоящего времени не уделено достаточного внимания.

Решение такой задачи требует использования данных о рельефе местности, типе местности, застройке, промышленных объектах и других пространственно-распределенных данных. Для работы с пространственно-распределенными данными в настоящее время широко применяются геоинформационные системы (ГИС). Существующие специализированные ГИС территориального планирования телекоммуникационных сетей (САПР «Балтика», программный комплекс «Эксперт», программный комплекс проекти-

рования и анализа радиосетей ПИАР, программный комплекс «Ресурс» и другие) не учитывают существующей ЭМЗ или же не проводят оптимизацию размещения и параметров РПС с учетом ЭМЗ.

Следовательно, задача оптимизации размещения РПС и их параметров по критерию электромагнитной безопасности (ЭМБ) и технической эффективности на территориях, имеющих ЭМЗ, является актуальной.

Объект исследования – сети связи и вещания. Предметом исследования в настоящей работе является электромагнитная безопасность и техническая эффективность указанных объектов.

Состояние вопроса. Масштабные исследования в нашей стране в области электромагнитной экологии и обеспечения электромагнитной безопасности проводятся г. Самаре. Этой проблеме посвящены работы Сподобаева Ю.М., Маслова О.Н., Бузова А.Л., Шередько Е.Ю., Романова В.А. Практической реализацией исследований стало создание программного комплекса анализа электромагнитной обстановки (ПК АЭМО), применение которого обязательно при подготовке санитарно-эпидемиологического заключения на радиотехнический объект, и ГИС ЭМБ, позволяющая проводить мониторинг электромагнитной обстановки на больших территориях. Однако вопросы обеспечения ЭМБ далеки от разрешения.

Цели и задачи исследования. Целью работы является повышения ЭМБ территорий, на которых располагаются РПС телекоммуникационных сетей, средств теле- и радиовещания.

Для достижения поставленной цели в диссертации решена задача разработки моделей, показателей эффективности, методов, алгоритмов и программных средств, позволяющих оптимизировать размещение и параметры РПС по критерию ЭМБ и технической эффективности на базе геоинформационных технологий. Она включает следующие частные задачи:

- разработка интегрированной модели расчета ЭМП РПС и методики ее применения;
- развитие методики построения карт ЭМЗ территории от действующих РПС;
- оптимизация размещения нового РПС на территории, имеющей ЭМЗ по критериям минимума площади с превышением предельно допустимого уровня (ПДУ) ЭМП и степени этого превышения, с учетом весовых объектов и радиопокрытия заданной области;
- оптимизация размещения сети новых РПС на территории, имеющей ЭМЗ по критериям минимума площади с превышением ПДУ ЭМП и степени этого превышения, с учетом весовых объектов и обеспечения радиопокрытия заданной области;
- разработка алгоритмов и программных средств решения задач территориального планирования сетей связи, реализующих решение этих задач.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели в работе используются методы математического моделирования, численные методы расчета, методы оптимизации, информационная структура баз данных, объектно-ориентированное программирование, методы расчета напряженности элек-

ромагнитного поля. При проведении расчетов применены современные средства: среда визуального программирования Borland Delphi 7.0 и отечественная универсальная ГИС «Карта – 2005».

Научная новизна работы. Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- предложена интегрированная модель расчета ЭМП и методика ее применения, основанная на управляющей последовательности применения (УПП);
- показана необходимость построения трехмерных карт ЭМЗ территорий;
- задача размещения РПС телекоммуникационной сети на территории, имеющей ЭМЗ, сформулирована как задача оптимизации;
- предложены показатели эффективности оптимального размещения РПС на обслуживаемой территории по условию радиопокрытия заданной территории и критериям минимальной площади территории с превышением ПДУ ЭМП и степени этого превышения;
- разработаны и реализованы алгоритмы численного поиска оптимального решения поставленных задач.

Достоверность результатов работы определяется корректным использованием математического аппарата, разработкой интегрированной модели на базе международно-признанных моделей расчета ЭМП, подтверждается результатами верификации с ПК АЭМО 3.0.3, а также сравнением расчетных и экспериментальных данных.

Практическая ценность работы. Оптимизация размещения и параметров РПС на этапе проектирования с использованием ГИС по предложенным критериям позволяет повысить ЭМБ территорий без ухудшения технической эффективности телекоммуникационных систем, уменьшить затраты на проектирование и его доработки.

Разработанный программный комплекс «Эколог-2008», реализующий решение поставленных задач с применением электронной карты г. Казани, может применяться при решении практических инженерных задач.

Программный комплекс используется в курсовом и дипломном проектировании студентами КГТУ им.А.Н.Туполева, обучающимися по направлениям «Радиотехника» и «Телекоммуникации».

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались на Международных НПК «Авиакосмические технологии и оборудование» в 2004, 2006 г.г., Международной НПК «Инфокоммуникационные технологии глобального информационного общества» в 2008 г., VI, VII Международных НПК «Физика и технические приложения волновых процессов» в 2007, 2008 г.г., Международных НПК «Инноватика – 2004», «Инноватика – 2007», «Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий в инновационных проектах» в 2004, 2007 г.г., XI, XII Международных молодежных НПК «Туполевские чтения» в 2004, 2005 г.г.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 8 - в трудах Международных и Российских научно-технических конференций, 3 – в виде статей в научно-технических журналах, в том числе 2

статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК. Получено свидетельство о регистрации разработки в отраслевом фонде алгоритмов и программ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Она содержит 137 страниц текста, список использованных источников, включающий 104 наименования, в том числе 13 работ автора.

Научные положения, выносимые на защиту:

- интегрированная модель расчета ЭМП и методика ее применения, основанная на УПП;
- алгоритм перехода между моделями расчета ЭМП, входящими в УПП;
- показатели эффективности оптимального размещения РПС на обслуживаемой территории по условию радиопокрытия заданной территории и критериям минимальной площади территории с превышением ПДУ ЭМП и степени этого превышения;
- постановка задачи размещения РПС телекоммуникационной сети на территории, имеющей ЭМЗ, как задачи оптимизации по предложенным показателям эффективности сети;
- алгоритмы и результаты численного решения задач оптимизация размещения одного и сети РПС на территории, имеющей ЭМЗ.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение обосновывается выбор темы исследования, ее актуальность, сформулированы цели и задачи исследования, теоретическая и практическая значимость работы. Описан состав и структура работы, имеющиеся публикации.

В первой главе приводится обзор современного состояния электромагнитной экологии (ЭМЭ) и проблем обеспечения ЭМБ, исследований в области ЭМЭ, а также отечественных и зарубежных работ, в том числе осуществляемых в рамках международных проектов. Отмечаются имеющиеся недостатки существующей системы контроля ЭМБ территорий, на которых располагаются РПС теле- и радиовещания.

В обзоре имеющихся работ по различным направлениям ЭМЭ указывается на отставание научно-технического направления, целью которого является разработка методов и средств анализа ЭМП в окружающей среде и, в случае необходимости, защиты от его воздействия.

Проводится обзор работ по научно-техническому направлению с целью определения требующих решения задач. В результате выяснено, что существующие программные средства территориального планирования не решают задач эффективного, с точки зрения требований ЭМБ, размещения антропогенных источников ЭМП.

Проводится обзор антропогенных источников ЭМЗ, выделение их характерных особенностей и степени опасности. Особое внимание уделено источникам ЭМП радиочастоты (РЧ). Последствия воздействий ЭМП РЧ весьма различны: в основном, они проявляются в подавление или стимулирование роста растений, усиление или ингибирование размножения насекомых, изме-

нение активности почвенных микроорганизмов, снижение репродуктивности животных. Средства РЧ диапазона сосредоточены в городах или в близлежащих районах, в местах сосредоточения или пребывания людей. Существующий лавинный рост количества РПС может приводить к ситуациям возникновения зон с уровнем ЭМП выше ПДУ. Ограничивать развертывание новых сетей или использование новых технологий не представляется возможным. Однако размещение радиопередающих средств по фактору ЭМБ с учетом технической эффективности позволит значительно уменьшить площадь зон с превышением уровня ЭМП вплоть до минимально возможного значения. Целесообразно проводить оптимизацию размещения и параметров средств РЧ в силу их широкого распространения, а также тенденции к увеличению количества и более плотного заполнения частотного диапазона.

Проводится обзор существующих нормативных документов в области ЭМБ и анализ предъявляемых требований к действующим РПС. Действующим документом, регламентирующим требования к ЭМБ передающих радиотехнических объектов, является СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03.

Для повышения эффективности решения задач, связанных с использованием пространственно-распределенных данных, целесообразно применять цифровые карты и ГИС. Проводится обзор проблемных и инструментальных ГИС. Среди проблемных ГИС не обнаружено систем, позволяющих решать задачи эффективного и безопасного, с точки зрения ЭМБ, размещения РПС. Среди инструментальных ГИС наиболее полно удовлетворяет предъявляемым требованиям ГИС «Карта -2005».

Обслуживаемая территория представляет собой поверхность S , на которой задан уровень электромагнитного загрязнения от существующих РПС и должно быть размещено дополнительно N РПС. Параметрами i -го РПС являются излучаемая мощность P_i , высота подвеса антенны h_i , координаты размещения (x_i, y_i) , рабочая частота f_i , коэффициент усиления и диаграмма направленности $F_i(\theta, \varphi)$. Каждое РПС имеет зону обслуживания $S_i\{P_i, h_i, (x_i, y_i), F_i(\theta, \varphi)\}$, в пределах которой выполняется условие:

$$E \geq E_{\min}, \quad (1)$$

где E - напряженность поля, создаваемая РПС, E_{\min} - минимально используемая напряженность поля – уровень напряженности электромагнитного поля, необходимый для приема с удовлетворительным качеством в присутствии шумов, но в отсутствие помех от других передатчиков.

Каждый вариант построения сети A из N РПС характеризуется техническим показателем эффективности \mathcal{E}_A , который зависит от параметров радиопередающих станций и является функцией нескольких переменных:

$$\mathcal{E}_A = \Phi(N, f_i, P_i, h_i, (x_i, y_i), F_i(\theta, \varphi)), \quad i = \overline{1, N}. \quad (2)$$

Задача нахождения оптимальной сети может быть сформулирована следующим образом: найти такую радиопередающую сеть A' , то есть такой набор параметров вводимых радиопередающих средств

$((N', P', h', (x_i, y_i)', F_i(\theta, \varphi)))$, где $i = \overline{1, N}$, который обладает наилучшим значением показателя эффективности \mathcal{A} :

$$\mathcal{A}(A') = \mathcal{A} = \max_{(N, f, P, h, (x_i, y_i), F_i(\theta, \varphi), i = \overline{1, N})} \mathcal{A}(A), \quad (3)$$

и удовлетворяет техническим ограничениям:

$$P_i < P_{\max}; h_i < h_{\max}; (x_i, y_i) \in S; i = \overline{1, N}. \quad (4)$$

Задача исследования заключается в разработке моделей, показателей эффективности, методов, алгоритмов и программных средств, позволяющих оптимизировать территориальное размещение и параметры РПС по критерию ЭМБ и технической эффективности на базе геоинформационных технологий.

Вторая глава посвящена описанию методик и методов исследования. Выделяются ключевые вопросы, требующие решения: определение методов и методик расчета ЭМП, формирование технически значимых показателей эффективности, на основании которых возможна реализация численных методов поиска и их выбор.

Рассматриваются два основных подхода к расчету ЭМП: статистический и детерминированный. Указываются их особенности и рекомендации по применению. Так, детерминированные методы расчета учитывают влияние местных условий и препятствий на трассе распространения сигнала. Полностью детерминированные методы расчета практически нереализуемы. Это связано с отсутствием полных данных и изменением параметров среды и объектов во времени на трассе распространения, а также отсутствием строгих электродинамических методов учета разнообразных препятствий и локальных особенностей. Даже незначительное смещение точки наблюдения приводит к сильному изменению напряженности поля с квазипериодом порядка длины волны в силу того, что оно является результатом сложной интерференционной суммы множества волн с различными фазами и амплитудами. Детерминированные методы следует использовать в тех случаях, когда возможна идеализация препятствий и подстилающей поверхности на трассе распространения электромагнитной волны. Статистические методы основаны на статистике множителя ослабления, полученной на основе многочисленных экспериментальных данных. Они находят широкое применение в существующих программных комплексах частотного и территориального планирования сетей радиосвязи.

Проводится обзор существующих моделей расчета ЭМП с оценкой границ применимости, рекомендованных для использования на территориях крупных городов и мегаполисов. Решается вопрос методики применения рассмотренных моделей.

Переход от одной модели к другой не должен приводить к скачкообразному изменению значения напряженности ЭМП. Так как нет универсальных моделей для всех типов местности и условий распространения, то вопрос перехода должен рассматриваться отдельно для каждого конкретного случая. Путем анализа зависимостей множителей ослабления для каждой модели находятся параметры, при которых переход от одной модели к другой будет

плавным. Решена задача автоматического плавного перехода от одной модели расчет ЭМП к другой. Предложено использование аппроксимирующей функции:

$$L(r) = \frac{(r_1 + 2\Delta r) - r}{2\Delta r} L_1(r) + \frac{r - r_1}{2\Delta r} L_2(r) \quad (5)$$

где r_1 - расстояние, с которого осуществляется переход между моделями; $2\Delta r$ - «коридор» перехода; r - текущее расстояние, $L_1(r), L_2(r)$ - множители ослабления моделей, участвующих в переходе.

В качестве модели расчета ЭМП предложена интегрированная модель на основе УПП. Она содержит хорошо зарекомендовавшие себя на практике модели расчета ЭМП РПС. Расчет параметров ЭМП для конкретной точки проходит в три этапа. На первом этапе определяются все параметры, составляющие границы применимости моделей. На втором этапе осуществляется построение функций для осуществления переходов от одной модели к другой. В качестве функций перехода между двумя моделями могут быть функции вида:

$$F_{\text{прх.1}}(x, y) = \begin{cases} 1, \text{при } r \leq r_{\text{т.перехода}} \\ 0, \text{при } r > r_{\text{т.перехода}} \end{cases}; F_{\text{прх.2}}(x, y) = \begin{cases} 0, \text{при } r \leq r_{\text{т.перехода}} \\ 1, \text{при } r > r_{\text{т.перехода}} \end{cases} \quad (6)$$

$$F_{\text{прх.1}}(x, y) = \begin{cases} 1, \text{при } L_1(r) \leq L_2(r) \\ 0, \text{при } L_1(r) > L_2(r) \end{cases}; \quad (7)$$

$$F_{\text{прх.2}}(x, y) = \begin{cases} 0, \text{при } L_1(r) \leq L_2(r) \\ 1, \text{при } L_1(r) > L_2(r) \end{cases}$$

$$F_{\text{прх.1}}(x, y) = \begin{cases} 1, \text{при } r \leq r_1 \\ \frac{(r_1 + 2\Delta r) - r}{2\Delta r}, \text{при } r_1 < r \leq r_1 + 2\Delta r \\ 0, \text{при } r > r_1 + 2\Delta r \end{cases} \quad (8)$$

$$F_{\text{прх.2}}(x, y) = \begin{cases} 0, \text{при } r \leq r_1 \\ \frac{(r - r_1)}{2\Delta r}, \text{при } r_1 < r \leq r_1 + 2\Delta r \\ 1, \text{при } r > r_1 + 2\Delta r \end{cases}$$

Функции вида (6) используются при осуществлении перехода в точке $r_{\text{т.перехода}}$, вида (7) используются при осуществлении перехода при пересечении зависимостей множителей ослабления от расстояния двух моделей, а вида (8) при осуществлении перехода в пределах коридора перехода путем аппроксимации множителей ослабления.

На третьем этапе производится вычисление параметров ЭМП на основе выбранной модели по УПП, которая представляет собой функцию вида:

$$L_{\text{УПП}}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n L_i(x, y) * F_{\text{исп.}i}(x, y) * F_{\text{прх.}i}(x, y) * F_{\text{оператор}}(i)}{\sum_{i=1}^n F_{\text{исп.}i}(x, y) * F_{\text{прх.}i}(x, y) * F_{\text{оператор}}(i)} \quad (9)$$

где $L_i(x, y)$ - множитель ослабления i -той модели, входящей в УПП; $F_{\text{исп.}i}(x, y)$ - признак, определяющий возможность использования модели (находится путем сравнения границ применимости модели с полученными на первом шаге и для точки (x, y) параметрами); $F_{\text{прх.}i}(x, y)$ - функция перехода между моделями; $F_{\text{оператор}}(i)$ - признак применения модели. Значения $F_{\text{оператор}}(i)$ задаются оператором. Они могут быть как бинарными (0 или 1) или же параметрическими, зависящими от различных условий и параметров.

Путем изменения $F_{\text{оператор}}(i)$ используемых моделей, входящих в УПП, и введения дополнительных условий в признак использования модели можно изменять набор моделей, используемых для расчета. Имеется возможность проводить расчет ЭМП сразу по нескольким моделям и аппроксимировать полученные результаты (9).

Применение УПП позволяет проводить расчет и оптимизацию для широкого диапазона расстояний и условий распространения радиоволны.

В состав УПП входят следующие модели: Уолфиша-Икегами, Кся-Бертони, Парсона, Окамуры, Хаты, Окамуры-Хаты с поправкой Девидсона, Рекомендации МСЭ-Р 370-7, 529-2, 1145, 1146, интерференционная формула Введенского.

Показатель эффективности сети сформулирован следующим образом:

$$\mathcal{A} = f(K_{\text{пт}}, K_{\text{загр.т.}}); \quad (10)$$

$$K_{\text{пт}} = \frac{S \bigcap_{i=1}^N S_i \{P_i, h_i, (x_i, y_i), F_i(\theta, \varphi)\}}{S}; \quad (11)$$

$$K_{\text{загр.т.}} = \frac{S \bigcap_{i=1}^N S_{\text{загр.}i} \{P_i, h_i, (x_i, y_i), F_i(\theta, \varphi)\}}{S}; i = \overline{1, N}. \quad (12)$$

где $K_{\text{пт}}$ - коэффициент радиопокрытия территории, $K_{\text{загр.т.}}$ - коэффициент ЭМЗ территории, $S_{\text{загр.}i}$ - ЭМЗ i -го РПС.

Варируя координаты (x_i, y_i) размещаемого РПС, находим оптимальную сеть, которая имеет максимальное значение коэффициента покрытия $K_{\text{пт}}$ и минимальное значение коэффициента загрязненности $K_{\text{загр.т.}}$ области S .

Этим требованиям удовлетворяет следующий показатель эффективности, который необходимо максимизировать:

$$\mathcal{A} = (-1)^{\text{sign}2(K_{\text{пз}} - K_{\text{пт}})} \left(\frac{1}{(K_{\text{загр.т.}})^{\text{sign}2(K_{\text{пт}} - K_{\text{пз}})}} * K_{\text{пт}} \right)^{(-1)^{\text{sign}2(K_{\text{пз}} - K_{\text{пт}})}} \quad (13)$$

где $K_{ПЗ}$ - заданный (необходимый) коэффициент радиопокрытия, а функция:

$$\text{sign2}(a) = \begin{cases} 1, & \text{если } a \geq 0 \\ 0, & \text{если } a < 0 \end{cases} \quad (14)$$

Показатель эффективности имеет две характерные области. Первая и основная рабочая область соответствует случаю, при котором выполняется условие радиопокрытия ($K_{ПТ} \geq K_{ПЗ}$). В этом диапазоне оптимизация проходит в положительной области значений показателя, проходя за счет уменьшения ЭМЗ территории.

При невыполнении условия радиопокрытия значения показателя эффективности становятся отрицательными, однако оптимизация происходит и в этой области, при этом целесообразно повышать мощности размещаемых РПС для выполнения условия радиопокрытия.

Предложено понятие «весовых объектов», на территории которых производится локальное ужесточение требований ЭМБ. К «весовым объектам», на наш взгляд, необходимо отнести территории детских садов, школ, больниц и других подобных учреждений.

Далее проводится обзор существующих методов оптимизации, в результате которого были выбраны следующие: метод циклического покоординатного спуска, метод циклического динамического программирования.

Третья глава посвящена решению конкретных задач анализа, а также задач оптимизации территориального размещения одного или сети РПС без учета и с учетом существующей ЭМЗ. Решение производится по предложенной методике расчета ЭМП, основанной на УПП. Решение задачи анализа составляет основу для проведения оптимизации размещения новых РПС. Задача анализа состоит в нахождении матрицы ЭМЗ, элементы которой вычисляются для каждой точки территории по следующей формуле:

$$K(x, y) = \sum_{i=1}^n \frac{E(x, y)_i^2}{E_{ПДУ_i}^2} + \sum_{i=1}^n \frac{ППЭ(x, y)_i}{ППЭ_{ПДУ_i}} \quad (15)$$

Данное выражение удобно для использования, так как дает возможность последовательного независимого вычисления матрицы ЭМБ для каждого РПС в каждой точке:

$$K_S = \sum_{i=1}^N K_{СРПС_i} \quad (16)$$

где $K_{СРПС_i}$ - матрица ЭМБ i -го РПС, K_S - матрица ЭМБ области S .

Для учета площадей санитарных зон используется $K_{загр.т.}$ следующего вида:

$$K_{загр.т.} = \frac{\sum_{x,y} \text{sign2}(K_S(x, y) - 1)}{S} \quad (17)$$

Однако мы считаем, что целесообразно учитывать не только площади санитарных зон, но и величину ЭМЗ в этих областях, а также влияние весовых объектов. Для выполнения этих условий предложен следующий $K_{загр.г.}$:

$$K_{загр.г.} = \frac{\sum_{x,y} \text{sign}2(K_s(x,y) - \frac{1}{\rho(x,y)}) * K_s(x,y) * \rho(x,y)}{S} \quad (18)$$

где матрица $\rho(x,y)$ - определяет весовые объекты на территории анализа и их значимость.

Решены модельные задачи анализа построения матриц и отображения карт ЭМЗ с данными близкими к реальным РПС в г. Казани:

- радиотелевизионный передающий центр (РТТЦ) (рис.1,2);
- РПС ДВ и СВ диапазона, FM-радио;
- РПС базовых станций систем сотовой связи.

В таблице 1 приведены результаты расчета $K_{загр.г.}$ на высотах 1,5, 15 и 30 м. для РТТЦ при добавлении РПС, установленных на одной мачте, по порядку.

Таблица 1

№ п/п	Наименование РПС	P, кВт	h, м	f, МГц	K _{загр.г.}		
					h2=1,5 м	h2=15 м	h2=30 м
1	ТВ – «1 канал»	5	150	49,75	0,00654	0,04635	0,05549
2	ТВ – «Татарстан»	5	150	77,25	0,05546	0,12286	0,14118
3	ТВ – «ТНВ»	2	150	59,25	0,07802	0,15561	0,17762
4	ТВ – «Культура»	20	150	559,25	0,13979	0,24075	0,27084
5	ТВ – «5-й Канал»	1	150	583,25	0,14292	0,24517	0,27567
6	Радио – «Россия»	4	100	68,47	0,19447	0,32632	0,36465
7	Радио – «Маяк»	4	100	70,43	0,24434	0,40974	0,45624
8	Радио – «Маяк FM»	1	100	101,3	0,25673	0,43064	0,47919

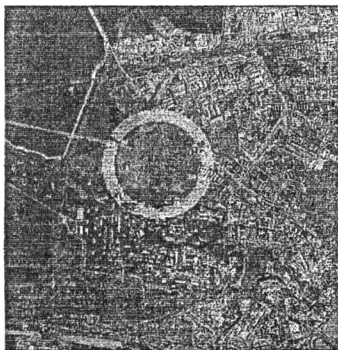


Рис.1. Карта ЭМЗ РТТЦ на высоте 1,5 м.

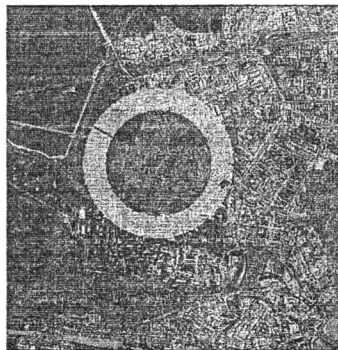


Рис.2 Карта ЭМЗ РТТЦ на высоте 30 м.

Радиус санитарной зоны (рис.1,2) и значение $K_{\text{загр.т.}}$ (табл.1) растут с увеличением высоты. Следует сделать вывод о необходимости построения карт ЭМЗ для ряда высот, то есть построения трехмерных карт ЭМЗ.



Рис.3. Зависимость $K_{\text{загр.т.}}$ от суммарной мощности РПС.

В результате (табл.2) установлено, что оптимизацией размещения РПС удастся уменьшить $K_{\text{загр.т.}}$ без заметного изменения $K_{\text{пт}}$. В ряде примеров, для которых в выражении (13) определяющую роль играет $K_{\text{загр.т.}}$, размещаемое РПС оказывалось на максимальном удалении от существующих источников ЭМЗ.

На рис.3 приведен график зависимости $K_{\text{загр.т.}}$ вида (18) от суммарной мощности включаемых последовательно РПС в составе РТПЦ (табл.1). При рассредоточении тех же РПС $K_{\text{загр.т.}}$ уменьшается на 32% (рис.3).

На основе карт ЭМЗ, полученных в задачах анализа, решена задача оптимизации размещения одного РПС (рис.4). Для сравнения проведена оптимизаций и без учета ЭМЗ (рис.5).

Таблица 2

Оптимальное расположение		
без учета ЭМЗ	с учетом ЭМЗ	
$K_{\text{пт}}$	$K_{\text{пт}}$	$K_{\text{загр.т.}}$
0,94515	0,9457	0,4797



Рис.4 Зона радиопокрытия при оптимальном расположении РПС без учета ЭМЗ ($K_{\text{пт}} = 0,94515$)

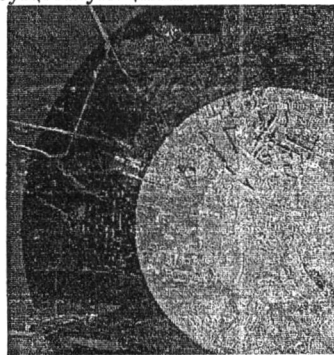


Рис.5 Зона радиопокрытия при оптимальном расположении РПС с учетом ЭМЗ ($K_{\text{пт}} = 0,9457$)

Решена задача размещения сети РПС на территории, имеющей ЭМЗ. На рис.6 показана карта ЭМЗ от существующих и вводимых РПС при их начальном расположении. На рис.7 приведена карта ЭМЗ при оптимальном положении пяти вводимых РПС. В результате оптимизации удалось добиться выигрыша в $K_{\text{загр.т.}}$ в 34%. В оптимальном варианте вводимые РПС сместились от действующих РПС.

В результате решения серии задач оптимизации показана результативность применения показателей эффективности (13 в вариантах применения

$K_{\text{зир.т.}}$ 17,18) в задачах оптимального размещения радиопередающих средств с учетом требований ЭМБ при выполнении условия обеспечения радиопокрытия территории.

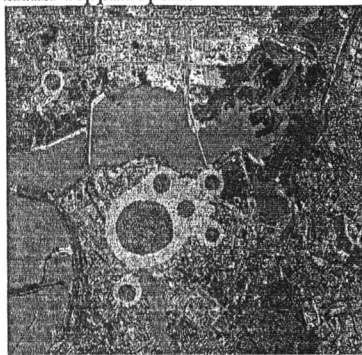


Рис.6 Карта ЭМЗ от 5 РПС до оптимизации ($K_{\text{зир.т.}} = 0.126868$)

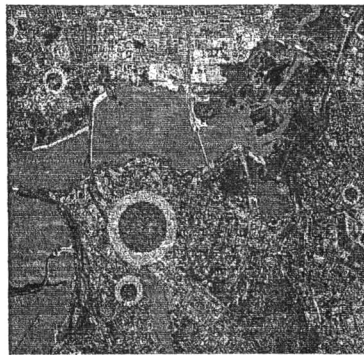


Рис.7 Карта ЭМЗ от 5 РПС оптимальное положение ($K_{\text{зир.т.}} = 0.09456$)

Четвертая глава посвящена описанию программного комплекса «Эколог-2008», в котором воплотились разработанные методики и алгоритмы.

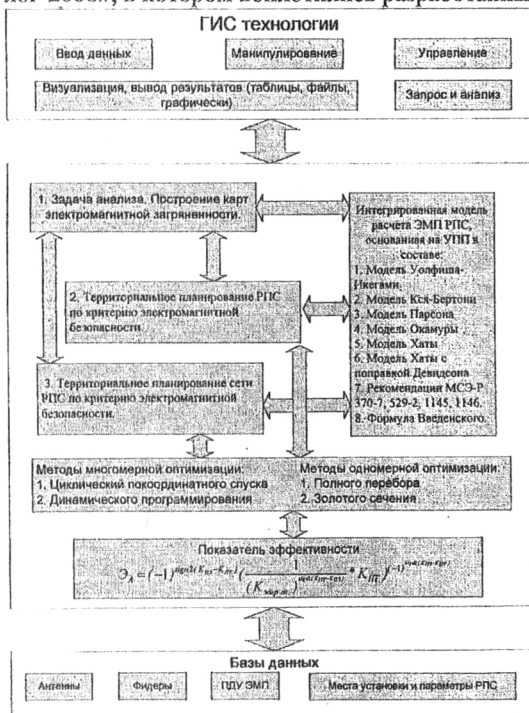


Рис.8 Обобщенная структурная схема ПК «Эколог-2008»

Структурная схема программного комплекса разбита на 3 блока (рис.8). Первый блок геоинформационных технологий содержит программные модули, которые предоставляет ГИС «Карта-2005».

Необходимая для решения задач информация о значениях ПДУ ЭМП, диаграммах направленности и параметрах существующих антенн, фидерах, координатах пунктов установки и параметрах РПС хранится в соответствующих базах данных. Вся совокупность баз данных составляет второй блок. В третий блок вынесены основные вычислительные функции программного комплекса (ПК), которые разработа-

ны в программной среде Borland Delphi. Этот блок реализован как подключаемая динамическая библиотека к ГИС «Карта 2005». В его состав входят:

- интегрированная модель и управляющая последовательность выбора моделей расчета ЭМП с их программной реализацией;
- подпрограмма расчета показателя эффективности;
- программная реализация алгоритмов оптимизации;
- программная реализация задач анализа и оптимизации.

В программе предусмотрена возможность задания: шага оптимизации, метода оптимизации, расположения радиопередающих средств на имеющихся инженерных сооружениях с указанием высоты дополнительно устанавливаемой мачты. При выборе метода оптимизации имеется возможность задания количества случайных начальных расположений РПС.

Основные технические характеристики ПК «Эколог-2008»:

- используемая топографическая основа – цифровая карта г.Казани масштаба 1:2000 со слоями рельефа, застройки и формируемым слоем зон радиопокрытия РПС и создаваемой ими ЭМЗ;
- решаемая задача анализа - построение карт ЭМЗ территории;
- решаемые задачи оптимизации - оптимизация размещения и параметров одного или сети РПС как без учета, так и с учетом существующей ЭМЗ;
- реализована возможность ввода исходных данных с клавиатуры или загрузки их из файлов;
- реализована возможность сохранения результатов в виде таблиц, текстовых файлов, вывода их на печать.

Для проверки достоверности результатов работы ПК «Эколог-2008», а также эффективности и точности используемых моделей было проведено сравнение расчетных значений напряженности ЭМП с экспериментальными результатами для 14 точек на местности. Математическое ожидание модуля отклонения расчетного значения от измеренного составляет $6,1 \text{ дБмкВ/м}$, его среднеквадратичное отклонение $\sigma = 3,3 \text{ дБмкВ/м}$.

Дополнительно проведен сравнительный расчет размеров санитарных зон с использованием ПК «Эколог-2008» и ПК АЭМО 3.0.3 для модели РТПЦ на высотах 1,5 и 30 м. Результаты расчетов в ПК «Эколог-2008» хорошо согласуются с результатами, полученными в ПК АЭМО 3.0.3. Расхождение составляет в разных направлениях 10-30%, что объясняется использованием различных моделей и учетом в ПК «Эколог-2008» рельефа местности и параметров застройки.

Приведенные данные свидетельствуют о работоспособности и достаточной для решения практических задач точности расчетов ПК «Эколог-2008».

Заключение содержит основные результаты диссертационной работы.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Совокупность результатов проведенной работы можно квалифицировать как решение актуальной задачи разработки моделей, показателей эффективности, методов, алгоритмов и программных средств, позволяющих оптими-

зировать размещение и параметры РПС по критерию ЭМБ и технической эффективности на базе геоинформационных технологий.

Основные выводы по работе можно сформулировать в виде следующих положений:

1. Разработана интегрированная модель расчета электромагнитного поля радиопередающего средства и методика ее применения, основанная на управляющей последовательности.

2. Развита методика построения карт электромагнитной загрязненности территории от действующих радиопередающих средств. Показана необходимость построения трехмерных карт электромагнитной загрязненности территорий.

3. Задача размещения радиопередающих средств телекоммуникационной сети на территории, имеющей электромагнитную загрязненность, сформулирована как задача оптимизации; предложены показатели эффективности оптимального размещения радиопередающих средств по условию обеспечения радиопокрытия заданной территории и критериям минимальной площади территории с превышением предельно допустимого уровня электромагнитного поля и степени этого превышения.

4. Сформулированы и решены задачи оптимизации размещения нового радиопередающего средства и сети новых радиопередающих средств на территории, имеющей электромагнитное загрязнение, по критериям минимума площади с превышением предельно допустимого уровня электромагнитного поля и степени этого превышения, с учетом весовых объектов и радиопокрытия заданной области.

5. Разработаны алгоритмы и программные средства решения задач территориального планирования сетей связи, реализующие решение перечисленных задач.

6. На примерах решения ряда задач показана результативность применения предложенных показателей эффективности в задачах оптимального размещения радиопередающих средств с учетом требований электромагнитной безопасности при выполнении условия радиопокрытия территории.

7. Разработан программный комплекс, реализующий решение задач анализа, построение карт электромагнитной загрязненности и решение оптимизационных задач. Получено свидетельство о регистрации программного комплекса «Эколог-2008» в отраслевом фонде алгоритмов и программ.

Таким образом, цель работы – повышение электромагнитной безопасности территорий, на которых располагаются радиопередающие средства телекоммуникационных сетей, средств теле- и радиовещания – достигнута.

СПИСОК РАБОТ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях, определённых ВАК

1. Едельсков, А.Е. Проектирование телекоммуникационных сетей с использованием геоинформационных технологий/ Г.И. Щербаков, В.Р.

- Линдваль, Е.А. Спирина, А.Е. Едельсков, Е.В. Нуждин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Том 10 №5. 2007 г. – С. 73-78.
2. Едельсков, А.Е. Оптимизация размещения и параметров радиопередающих средств по фактору электромагнитной безопасности/ А.Е. Едельсков// Журнал «Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева» Том 4. Казань, 2008. – С. 65-67.
Работы, опубликованные в других изданиях
3. Едельсков, А.Е. Геоинформационные технологии как средство развития региональных сетей телерадиовещания/ Г.И. Щербаков, В.Р. Линдваль, Е.А. Спирина, А.Е. Едельсков // Материалы Международной научно-технической конференции и Российской научной школы молодых ученых и специалистов «Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика -2004)». Часть 7, том 2. Москва: «Энергоатомиздат», 2004. – С.136-141.
4. Едельсков, А.Е. Геоинформационные технологии как средство развития сетей вещания / Г.И. Щербаков, В.Р. Линдваль, Е.А. Спирина, А.Е. Едельсков // Журнал «Вестник компьютерных и информационных технологий» №1. Москва: «Издательство Машиностроение», 2005. – С.13-16.
5. Едельсков, А.Е. Методы и современные средства решения задач электромагнитной экологии/ А.Е. Едельсков, В.Р. Линдваль // Материалы Международной молодежной научной конференции, посвященной 1000-летию города Казани «Туполевские чтения». Том 4. Казань, 2005. – С.14-15.
6. Едельсков, А.Е. Исследование и оптимизация излучающих систем с учетом экологических требований/ В.Р. Линдваль, А.Е. Едельсков, В.Н. Иванов // Материалы международной научно-практической конференции «Авиакосмические технологии и оборудование» 15-16 августа 2006 г. Казань, 2006. – С. 229-230.
7. Едельсков, А.Е. Обеспечение требований электромагнитной безопасности при проектировании сетей вещания/ А.Е. Едельсков // Труды VI международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». Приложение к журналу. Казань, 2007. – С. 214-215.
8. Едельсков, А.Е. Проектирование телекоммуникационных сетей с использованием геоинформационных технологий/ Г.И. Щербаков, В.Р. Линдваль, Е.А. Спирина, А.Е. Едельсков, Е.В. Нуждин // Материалы Международной научно-технической конференции и Российской научной школы молодых ученых и специалистов «Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика -2007)». Часть 2, том 1. Москва: «Энергоатомиздат», 2007. – С. 14-17.

9. Едельсков, А.Е. Проектирование телекоммуникационных сетей на основе параметрической оптимизации и геоинформационных технологий/ Г.И. Щербаков, В.Р. Линдваль, Е.А. Спирина, Е.В. Нуждин, А.Е. Едельсков // Тезисы докладов 6-й международной научно-практической конференции «Инфокоммуникационные технологии глобального информационного общества». Казань: «Издательство», 2008. – С. 187-192.
10. Едельсков, А.Е. Оптимизация размещения и параметров радиопередающих средств с учетом электромагнитной безопасности/ А.Е. Едельсков, В.Р. Линдваль, Е.А. Спирина // Тезисы VII Международной научно-практической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». Самара, 2008. – С. 248-249.
11. Едельсков, А.Е. Проектирование телекоммуникационных сетей на основе параметрической оптимизации и геоинформационных технологий/ Г.И. Щербаков, В.Р. Линдваль, Е.А. Спирина, Е.В. Нуждин, А.Е. Едельсков // Сборник трудов 6-й международной научно-практической конференции «Инфокоммуникационные технологии глобального информационного общества». Казань, 2008. – С. 171-180.
- Свидетельства об отраслевой регистрации разработки*
12. Программный комплекс «Эколог – 2008» / А.Е. Едельсков, В.Р. Линдваль, Е.А. Спирина // Отраслевой фонд алгоритмов и программ. Свидетельство №11834 от 9.12.2008 об отраслевой регистрации разработки.

10-